

PROJEKTOVANJE IoT UREĐAJA SA MOGUĆNOŠĆU PRIKUPLJANJA ENERGIJE SA PROVODNIKA INDUSTRIJSKIH INTERFEJSA**DESIGN OF IoT DEVICE WITH THE ABILITY TO HARVEST ENERGY FROM THE LINES OF AN INDUSTRIAL INTERFACE**

Andraš Halgato, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu je opisan IoT uređaj sa mogućnošću prikupljanja energije sa provodnika industrijskih interfejsa. Predstavljene su različite metode za ograničavanje struje. Detaljno je prikazano projektovanje kola za strujno ograničavanje, koje je nezavisno od veličine ulaznog napona. Takođe, opisane su procedure za merenje vremena potrebnog za punjenje superkondenzatora. Prikazani su simulacioni rezultati napona i struja od interesa pri različitim uslovima, i merni rezultati pri korišćenju uređaja u realnom okruženju.

Gljučne reči: IoT, superkondenzator, simulacije, štampana kola, strujno ograničavanje

Abstract – This paper describes a smart device capable of harvesting energy from the lines of industrial interfaces. The implementation of a current limiting circuit, which is independent of the intensity of the input voltage, is explained in detail. Various methods for current limiting are presented. Several procedures for measuring the time required to charge a supercapacitor are described. Simulation results of voltages and currents of interest under various conditions, and measurement results when using the device in a real environment, are shown.

Keywords: IoT device, supercapacitor, simulation, printed circuit board, current limiting

1. UVOD

Električni sistemi sa malom potrošnjom energije, projektovani na bazi silicijuma, stvorili su neke potpuno nove mogućnosti u razvoju elektronike. Obezbedili su razvoj minijaturnih, prenosivih, pa čak i modularnih elektronskih uređaja. Broj umreženih uređaja (eng. *Internet of Things*) se veoma brzo povećava u svakodnevnom životu. Sve više elektronskih uređaja se povezuje na internet mrežu. Svi ovi uređaji očitavaju ili šalju neke podatke preko mreže i koriste skladištenje podataka na oblaku (eng. *Cloud Storage*).

Ovakvi uređaji uglavnom imaju malu potrošnju električne energije. Ne zahtevaju velika napajanja, ali ipak, energija

se mora nekako dovesti do njih i, pri projektovanju sistema, najveći izazov predstavlja realizacija napajanja ovih električnih kola.

Svi ovi uređaji zahtevaju neku vrstu kompaktnog, jeftinog i lakog izvora napajanja, da bi se osigurala prenosivost i autonomija. Prvenstveno se koriste baterije za akumulisanje energije, čiji se kapacitet drastično povećao u prethodnih 15 godina. Pojavile su se i mnoge druge alternative za skladištenje energije, međutim nijedna druga metoda ne može da obezbedi toliki kapacitet za skladištenje električne energije kao baterije ili akumulatori. Alternativno rešenje za skladištenje naelektrisanja predstavlja superkondenzator koji se sve češće primenjuje, kako kod malih umreženih uređaja, tako i kod električnih automobila, a i u većim – zahtevnijim električnim sklopovima [1].

Uređaji za prikupljanje energije koji pretvaraju ambijentalnu energiju u električnu privukli su veliko interesovanje u vojnom i komercijalnom sektoru. Energija se takođe može sakupljati za napajanje malih autonomnih senzora, kao što su senzori razvijeni u MEMS tehnologiji. Ovi sistemi su često vrlo mali i zahtevaju malo energije, ali njihove primene su ograničene oslanjanjem na baterijsku energiju. Sakupljanje energije iz ambijentalnih vibracija, vetra, toplote ili svetlosti moglo bi omogućiti pametnim sensorima da funkcionišu neograničeno [2].

U ovom radu je prikazan IoT uređaj sa mogućnošću prikupljanja energije sa provodnika industrijskih interfejsa.

2. PROJEKTOVANJE KOLA ZA OGRANIČAVANJE STRUJE

Cilj rada je razvijanje IoT uređaja koji prikuplja energiju sa vodova (provodnika) industrijskih interfejsa, koristeći superkondenzator za skladištenje energije. Uređaj treba da se napaja iz postojećih industrijskih mreža, konkretno sa Meter Bus linija za prenos podataka, omogućavajući mu autonomno funkcionisanje bez eksternog izvora napajanja.

Ključan deo uređaja je električno kolo koje ograničava potrošnju na maksimalno 15 mA, bez obzira na varijacije napona napajanja. Sve komponente, uključujući ESP8685 Espressif mikrokontroler [3], pažljivo su odabrane kako bi minimizovale potrošnju energije, čineći uređaj energetski efikasnim za industrijska okruženja. Mikrokontroler omogućava daljinsko praćenje i upravljanje putem

NAPOMENA: Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bila dr Mirjana Damjanović, red. prof.

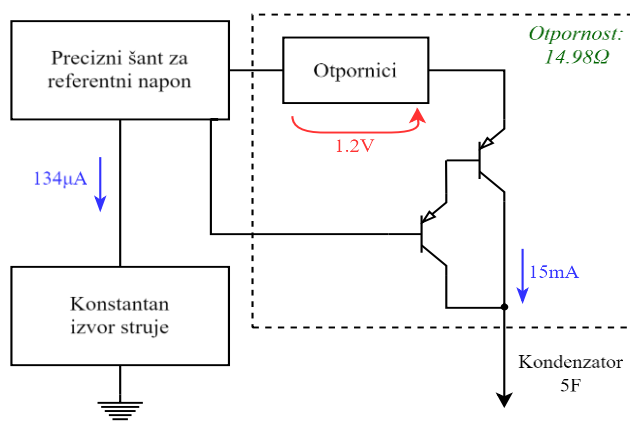
interneta. Ova funkcionalnost je važna jer omogućava daljinsko praćenje mernih podataka i upravljanje uređajem putem internet mreže. Takođe, uređaj obezbeđuje očitavanje određenih parametara sa Meter Bus linija i bežično prenošenje podataka ka centralizovanom sistemu za analizu.

Postoje mnogobrojna rešenja za ograničavanje strujne potrošnje nekog uređaja [4], [5]. Ipak, nijedno od tih rešenja nema mogućnost ograničenja strujne potrošnje, tako da bude nezavisna od veličine ulaznog napona. Nakon sprovođenja brojnih eksperimenata, s ciljem ograničenja strujne potrošnje na 15 mA, izabrane su integrisane komponente LM334 i LM4041 sa dodatnim tranzistorima i diodama za postizanje odgovarajuće strujne potrošnje (slika 1).

Podešavanjem vrednosti struje koju LM334 odvodi sa priključka povratne sprege (eng. *Feedback Pin*) LM4041 komponente i formiranjem napona otpornicima u grani "feedback" priključka, dobijaju se dve konstantne vrednosti (konstantno odvođenje struje i konstantan napon na otpornicima). Ove vrednosti se ne menjaju promenom veličine ulaznog napona, pa samim tim neće se menjati ni strujna potrošnja. Dakle, upotrebom ovih komponenti je u istom trenutku pokriven širok opseg ulaznih napona, ali je i strujna potrošnja ograničena na 15 mA.

Obezbeđivanjem širokog opsega ulaznog napona, postiže se veća fleksibilnost i univerzalnost uređaja, jer se na taj način otvaraju neke druge mogućnosti punjenja superkondenzatora. Strujno ograničenje se uvodi zato što se uređaj napaja samo superkondenzatorom od 5 F, tj. napaja se bez vlastitog izvora energije, kao što je baterija ili mrežni adapter. Sve dok se kondenzator ne napuni do neke granične vrednosti, ESP8685 ostaje bez nominalnog napajanja, te neće ništa očitavati niti slati.

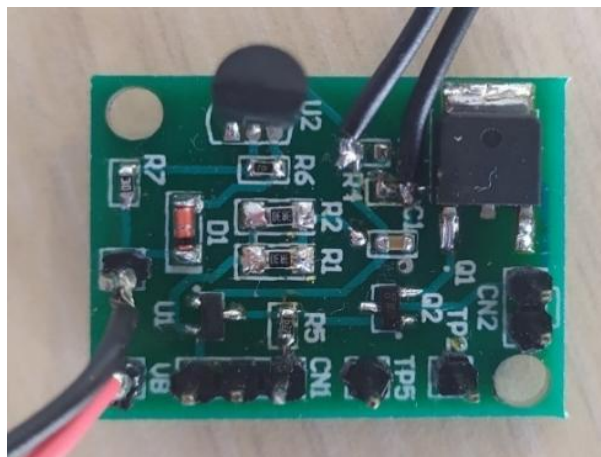
Kolo za ograničavanje struje se sastoji od dva dela. U prvom delu je projektovano napajanje uređaja. Ovo kolo obezbeđuje napajanje ESP8685 modulu, pomoću kojeg se šalju odgovarajući podaci preko internet mreže. Međutim, pored ovih funkcija, najbitnija funkcionalnost ovog dela jeste podešavanje konstantnog napona i potrošnje struje na određene vrednosti. Fotografija dela realizovanog IoT uređaja koji služi za ograničavanje struje je prikazana na slici 2.



Slika 1. - Blok šema kola za ograničavanje struje korišćenjem LM4041 i LM334 integrisanih kola

U drugom delu kola se nalazi sam ESP8685 mikrokontroler. Za uspostavljanje veze između glavnog i

sporednog dela uređaja na M-Bus magistrali, korišćena je TSS721 komponenta, koji ima ulogu da prilagodi naponske nivoe glavnog i zavisnog uređaja. Drugim rečima, ovaj deo koristi se za podešavanje nivoa napona logičke "1" i "0". Dodatno, obezbeđuje galvansku izolaciju zavisnih uređaja sa optokaplerima (eng. *Optocoupler*).



Slika 2. Štampana pločica kola za ograničavanje strujne potrošnje

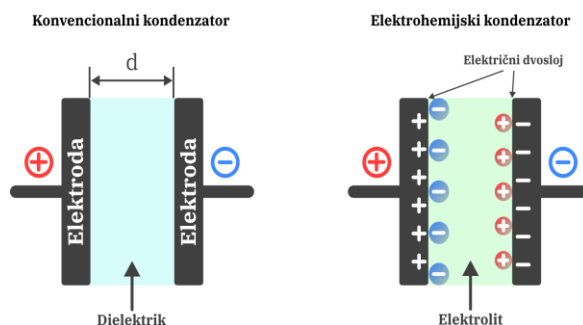
3. SKLADIŠTENJE ENERGIJE POMOĆU SUPERKONDENZATORA

Superkondenzatori, koji se nazivaju još i kondenzatorima sa visokim kapacitetom ili ultrakondenzatorima, smatraju se komponentama koje premošćuju jaz između elektrolitskih kondenzatora i punjivih baterija (slika 3), [1]. Prvobitno su ih razvijali u vojne svrhe, kasnije su se unapređivali za upotrebu u električnim automobilima. Mogu da akumuliraju od 10 do 100 puta više energije od klasičnih elektrolitskih kondenzatora.

Očigledna prednost ove komponente je da se može napuniti brže nego punjiva baterija. Dodatno, mogu pretrpeti znatno veći broj cikličnih punjenja i pražnjenja. Mogu se podeliti na tri glavne grupe:

1. elektrohemijske kondenzatore (EDLC),
2. pseudokondenzatore (PC) i
3. hibridne kondenzatore.

Superkondenzatori se zasnivaju na dva elektrohemijska fenomena, na elektrohemijskom dvojnomo sloju i elektrohemijskoj difuziji.



Slika 3. - Ilustracija konvencionalnog i elektrohemijskog kondenzatora [1]

4. PROJEKTOVANJE IoT UREĐAJA SA MOGUĆNOŠĆU PRIKUPLJANJA ENERGIJE

Savremena pametna digitalna brojila za električnu energiju, koji se često zovu i modularnim pametnim brojilima, obično raspolažu i nekim dodatnim priključcima za prenos podataka pomoću odgovarajućeg komunikacionog protokola. Neki od takvih prototola su M-Bus protokol [6] ili P1 serijski komunikacioni protokol.

Ovi priključci primarno služe za povezivanje uređaja za očitavanje stanja električnog brojila i korišćeni su za realizaciju predloženog IoT uređaja. Predviđen je i USB priključak za punjenje superkondenzatora. Pomoću njega uređaj može da se dovede u spremno stanje, gde će moći da radi obradu podataka čim se poveže sa nekim sistemom.

Princip rešenja opisanog u ovom radu se zasniva na korišćenju superkondenzatora za sakupljanje i skladištenje energije [2], [7].

Podrazumeva se da povećanje ili smanjenje kapacitivnosti superkondenzatora može uticati na vreme rada pametnog uređaja, što utiče i na period očitavanja i slanja podataka.

Da bi se izračunalo vreme punjenja kondenzatora, mora se uzeti u obzir i vremenska konstanta τ električnog kola. Uzimajući u obzir otpornost tranzistora, ukupna otpornost preko koje se puni kondenzator je:

$$R = 1,65 \, \Omega + 13,33 \, \Omega = 14,98 \, \Omega, \quad (1)$$

tako da je vremenska konstanta:

$$\tau = R \cdot C = 14,98 \, \Omega \cdot 5 \, \text{F} = 74,9 \, \text{s}. \quad (2)$$

U idealnom slučaju, smatra se da će kondenzator od 5 F biti potpuno napunjen nakon vremena smirivanja, tj. $5 \cdot \tau = 374,5 \, \text{s}$. Ovo važi samo u slučaju da nema strujnog ograničenja.

Ukoliko se uzme u obzir i strujno ograničenje od 15 mA, dobija se nešto drugačija vrednost za vreme punjenja.

Ako se pretpostavi da se kondenzator puni napajanjem od 5 V, i ako je u kolo, u paraleli, priključena i jedna cener dioda za zaštitu kondenzatora od prekomernog punjenja čiji je napon proboja (eng. *Breakdown Voltage*) 4,7 V, interval punjenja kondenzatora T se može odrediti kao:

$$T = C \cdot \frac{U_0}{I_0} \quad (3)$$

gde je U_0 vrednost napona koju treba da dostigne kondenzator, a struja I_0 je strujno ograničenje. Kada se u jednačinu uvrste konkretne vrednosti dobija se:

$$T = C \cdot \frac{U_0}{I_0} = 5 \, \text{F} \cdot \frac{4,8 \, \text{V}}{15 \, \text{mA}} = 1600 \, \text{s} \quad (4)$$

Dakle, superkondenzator kapacitivnosti 5 F, u kolu gde postoji strujno ograničenje od 15 mA i potrošač od 14.98 Ω , potpuno će se napuniti za 26 minuta i 40 sekundi.

5. REZULTATI MERENJA I SIMULACIJA

Da li se izvršila simulacija rada projektovanog kola sa strujnim ograničenjem, korišćen je LTspice programski alat. Kolo koje se simulira je prikazano na slici 4, a rezultati simulacija na slici 5.

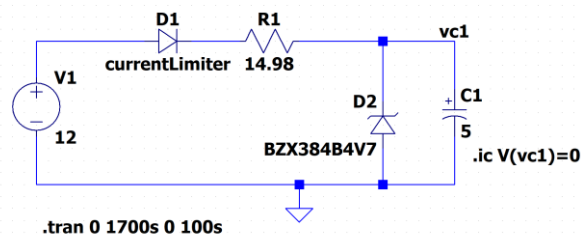
Treba napomenuti da je projektovano kolo za strujno ograničenje modelovano pomoću diode D1, koja u svom

modelu ima ugrađen parametar za maksimalnu struju koju može da obezbedi.

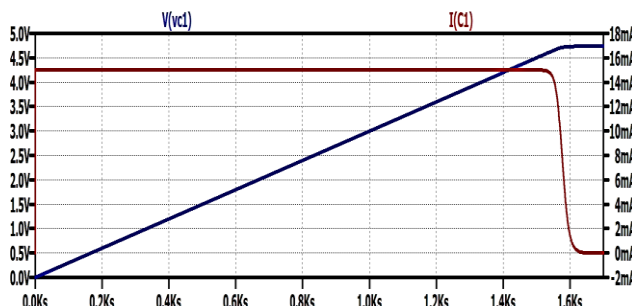
Na osnovu simulacijom dobijenih vrednosti za napon na kondenzatoru (plava boja) i struju (crvena boja) može se zaključiti da se simulacije dobro slažu sa izračunatim vrednostima (jednačina (4)). Simulacijama određeno vreme punjenja je 1620 s.

Punjenje superkondenzatora prestaje kada se napuni na 4,7 V, odnosno kada se uključi Cener dioda koja sprečava dalje punjenje. Tada i struja punjenja kondenzatora naglo opada.

.model currentLimiter D(Ron=1u Vfwd=0 Roff=1g ilimit=15m)



Slika 4. Kolo za simulaciju punjenja superkondenzatora C1



Slika 5. Simulacija punjenja superkondenzatora C1 naponom napajanja od 12 V (napon na kondenzatoru je prikazan plavom bojom, a struja crvenom)

Nakon što su završeni svi neophodni proračuni i simulacije, IoT uređaj je realizovan, i izvršena su njegova testiranja. Testiranje je od ključnog značaja jer omogućava validaciju i verifikaciju rezultata dobijenih kroz proračune i simulacije.

Proces merenja je izveden korišćenjem prototipa "smart meter" uređaja, koji nije bio opremljen strujnim ograničavačem. Zato je posebno dizajniran strujni ograničavač, koji je korišćen isključivo za merenje i testiranje funkcionalnosti uređaja (slika 2). Merna postavka je bila sastavljena od jednog standardnog laboratorijskog napajanja i dva multimetra.

Uređaj je testiran pri naponima napajanja od 5 V, 8 V i 12 V. Napon napajanja od 5 V nije davao zadovoljavajuće rezultate, jer se kondenzator napunio samo do 3,74 V (slika 6). Kada je priključeno napajanje sa višim naponima, od 8 V i od 12 V, sam uređaj, kao i njegovo kolo za strujno ograničavanje, su radili na adekvatan način. Napon na kondenzatoru je dostigao 4,6 V (slika 7). Pri naponu napajanja od 12 V, izmerena je strujna potrošnja od 16,94 mA, kao što je prikazano na slici 8.



Slika 6. Izmerena vrednost napona na kondenzatoru pri napajanju od 5 V



Slika 7. Izmerena vrednost napona na kondenzatoru pri napajanju od 12 V



Slika 8. Izmerena strujna potrošnja IoT uređaja pri naponu napajanja od 12 V

6. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada projektovano je strujno ograničavačko kolo IoT uređaja i analiziran je njegov rad pri različitim naponima napajanja. Ovo je važno jer IoT uređaj treba da ima strujno ograničenje, nezavisno od veličine napona koji se dovodi na njegov ulaz.

Testiranje uređaja je obuhvatalo i postupak merenja vremena punjenja superkondenzatora pri različitim naponima i strujnim granicama. Zaključeno je da napon od 5 V ne može da se koristi za napajanje uređaja, jer nije dovoljno visok da se kondenzator napuni.

Prilikom testiranja punjenja kondenzatora na 8 V i 12 V, strujna zaštita se aktivirala, a kondenzator se napunio do 4,6 V za 23 minuta i 7 sekundi, pri strujnom ograničenju od 15 mA.

Izvršena su merenja i sa strujnim ograničenjem od 25 mA i naponom napajanja od 12 V. U tom slučaju, kondenzator se brže napunio do 4,6 V – za 15 minuta i 2 sekunde.

U budućem radu, moguće je dalje unaprediti rad uređaja i istražiti sledeće mogućnosti:

1. dodatno smanjiti potrošnju uređaja, korišćenjem komponenti koje imaju još manju potrošnju (mikrokontroler, tranzistori i ostale integrisane komponente),
2. optimizacija programskog koda mikrokontrolera,
3. istražiti mogućnost punjenja superkondenzatora putem provodnika nekog drugog komunikacionog protokola,
4. smanjivanje dimenzija štampane ploče uređaja.

Ono što bi u budućem radu trebalo ispitati je i međusobni uticaj komponenti. Pri tome, treba voditi računa da li će se uvođenjem ovih modifikacija pojaviti i neki neželjeni efekti, čime bi se narušila efikasnost kola.

LITERATURA

- [1] Internet stranica: „Supercapacitor”, <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>, pristupljeno: mart 2024.
- [2] DigiKey's European Editors: „Energy Harvesting for Industrial Networking”, 2012, Internet stranica: <https://www.digikey.com/en/articles/energy-harvesting-for-industrial-networking>, pristupljeno: mart 2024.
- [3] Tehnička dokumentacija: „ESP8685 Series“, Espressif Systems, 2024, internet stranica: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8685_datasheet_en.pdf, pristupljeno: jun 2024.
- [4] NextPCB: „Current Limiting Circuits: A Complete Guide“, Internet stranica: <https://www.nextpcb.com/blog/current-limiting-circuit>, pristupljeno: jun 2024.
- [5] Internet stranica: „Current limiting”, https://en.wikipedia.org/wiki/Current_limiting, pristupljeno: jun 2024.
- [6] OMS Group: „M-Bus - The Standard for Remote Reading of Smart Meters“, 2020. Internet stranica: <https://m-bus.com/>, pristupljeno: mart 2024.
- [7] „Energy harvesting”, Internet stranica: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_harvesting, pristupljeno: maj 2024.

Kratka biografija:



Andraš Halgato rođen je u Vrbasu 1997. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Energetika, elektronika i telekomunikacije – Primenjena elektronika odbranio je 2024.god.

Kontakt:
andras.halgato@gmail.com